

В. Б. УСПЕНСКИЙ, канд. техн. наук,
А. Д. АСЮТИН, аспирант НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНОГО БЛОКА НА ДВУХОСНОМ ПОВОРОТНОМ СТОЛЕ

Розроблено імітаційну модель руху ІБ, встановленого на двовісний поворотний стіл (ДПС). Модель дозволяє генерувати показники інерціальних датчиків, адекватні їх реальній роботі, при різних видах руху, характерних для ДПС. Дані, що генеруються моделлю, можуть використовуватися для створення і відладки алгоритмів паспортизації ІБ.

Разработана имитационная модель движения ИБ, установленного на двухосный поворотный стол (ДПС). Модель позволяет генерировать показания инерциальных датчиков, адекватные их реальной работе, при различных видах движения, характерных для ДПС. Генерируемые моделью данные могут использоваться для создания и отладки алгоритмов паспортизации ИБ.

The simulation model of the motion of IB, set on a biaxial turning table (BTT), is developed. The model allows to generate the testimonies of inertial sensors, adequate to their real work, sight different, characteristic for BTS motion. The information generated by a model can be used for creation and debugging of algorithms of the passport system of IB.

Введение. В состав бесплатформенной инерциальной навигационной системы, как правило, входят три гироскопа и три акселерометра, с помощью которых соответственно измеряется вектор угловой скорости вращения и вектор кажущегося ускорения [1]. Указанные измерения реализуются с ошибкой, обусловленной не идеальностью самого датчика, его электронных компонент, преобразующих сигнал, а также погрешностью установки датчика в инерциальном блоке (ИБ).

Для разделения совокупной ошибки измерения по перечисленным факторам используется *система инструментальных погрешностей* инерциального блока, включающая в себя:

- *смещение «нуля»* датчиков, под которым понимается величина выходного сигнала при отсутствии измеряемого фактора;
- *погрешность масштабного коэффициента* преобразования аналогового выходного сигнала датчика в цифровой код;
- *угловые параметры несоосности* осей чувствительности датчиков с осями виртуальной ортогональной системы координат, принимаемой в качестве базовой.

Изменение во времени перечисленных погрешностей носит сложный характер. В их динамике можно выделить «быструю» и «медленную» составляющие. «Быстрая» составляющая зависит от внешних факторов, таких как температура и скорость ее изменения, магнитное поле, линейное и угловое ускорение и др. «Медленная» связана с выработыванием ресурса датчика и

обуславливается изменением в ходе эксплуатации свойств материала, из которого он изготовлен, используемых в нем сред, износом элементов.

Для повышения точности изменений необходимо оценивать указанные погрешности и алгоритмически их компенсировать. Такая оценка осуществляется, как правило, в три этапа.

Первый этап реализуется после изготовления инерциального блока в заводских (лабораторных) условиях. В ходе этого этапа оценивается «быстрая» составляющая погрешностей, выявляется и параметризуется ее зависимость от внешних факторов, критичных для данного датчика. Такую формальную зависимость будем называть *математической моделью* погрешностей, а процедуру определения ее параметров - *паспортизацией* блока. Процедура паспортизации характерна большим объемом измерений, она занимает продолжительное время и требует специального оборудования и метрологического обеспечения. В состав используемого при этом высокоточного оборудования входят, как правило, одно-, двух- или трехосные поворотные стенды. Второй этап – регламентный контроль и корректировка параметров модели в ходе эксплуатации. Третий этап – оценка текущих значений остаточных погрешностей, некомпенсированных с помощью математической модели, непосредственно в процессе функционирования. Проведение и обработка измерений на каждом этапе производится по своим методикам [2,3]. Несмотря на многочисленные примеры, описанные в литературе, разработка эффективной методики паспортизации и докалибровки ИБ навигационных систем, особенно с использованием относительно недорогого лабораторного оборудования, остается актуальной.

Постановка задачи. Данная статья связана с разработкой методического и алгоритмического обеспечения паспортизации ИБ с использованием специального оборудования – двухосного поворотного стола (ДПС) и посвящена разработке имитационной модели движения ИБ, установленного на ДПС. Такая модель, реализованная программно, позволяет генерировать показания инерциальных датчиков, адекватные их реальной работе, при различных видах движения, характерных для ДПС. Генерируемые моделью данные необходимы для создания и отладки алгоритмов паспортизации ИБ. Разработанное программное средство позволяет также выявить последовательность тестовых движений ДПС для наиболее эффективной паспортизации блока.

Таким образом, решаемая в данной статье задача непосредственно связана с повышением точности функционирования инерциальных навигационных систем.

Описание алгоритма. Общая методика построения имитационной модели, использованной далее, изложена в [4]. В данной статье рассматривается частный случай движения, обеспечиваемого ДПС, упрощенная схема которого приведена на рис.1, для которого доработана упомянутая модель.

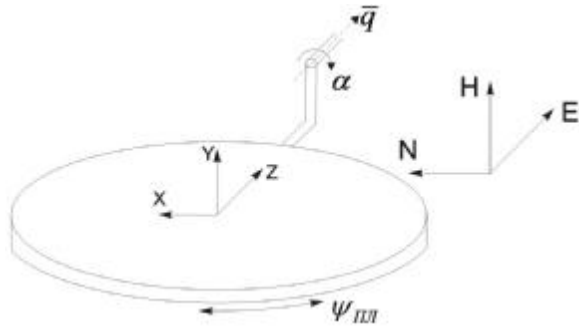


Рис. 1. Схема ДПС

Поворотная платформа ДПС, на которую устанавливается ИБ, имеет две степени свободы: поворот вокруг оси Y на угол $\psi_{пл}$ и поворот платформы вокруг оси, совпадающей с вектором \bar{q} , жестко связанным с неподвижной частью ДПС, на угол α . Данная установка имеет ряд особенностей и ограничений на движение, а именно:

- осуществлять вращение вокруг оси Y возможно только в случае, когда угол α равен нулю;
- угол α может меняться в пределах $[-2p; 2p]$;
- точно известна начальная азимутальная ориентация ИБ.

Отметим, что с помощью данного поворотного стола можно реализовать любую ориентацию ИБ в пространстве.

Поворачивая платформу на углы $\psi_{пл}$ и α , необходимо определить углы курса, тангажа и крена ИБ, установленного на платформе, а также показания его датчиков в процессе угловых маневров. При решении данной задачи будем предполагать, что географические координаты платформы (долгота и широта) остаются неизменными.

Чтобы обеспечить неразрывность и целостность выходных данных имитатора движения, введем зависимости $\psi_{пл}(t)$ и $\alpha(t)$ в виде полиномов третьего и пятого порядка соответственно.

$$\psi_{пл}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3,$$

$$\alpha(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5;$$

Функция $\psi_{пл}(t)$ должна быть неразрывной вместе со своей первой производной. Таким образом, параметры $\psi_{пл}(t)$ будем определять, исходя из краевых условий для самой функции и ее первой производной.

Соответственно параметры $\alpha(t)$ будем определять, исходя из краевых условий для самой функции, ее первой и второй производной.

На рисунке 2 приведена блок-схема алгоритма определения выходных данных модели ДПС.

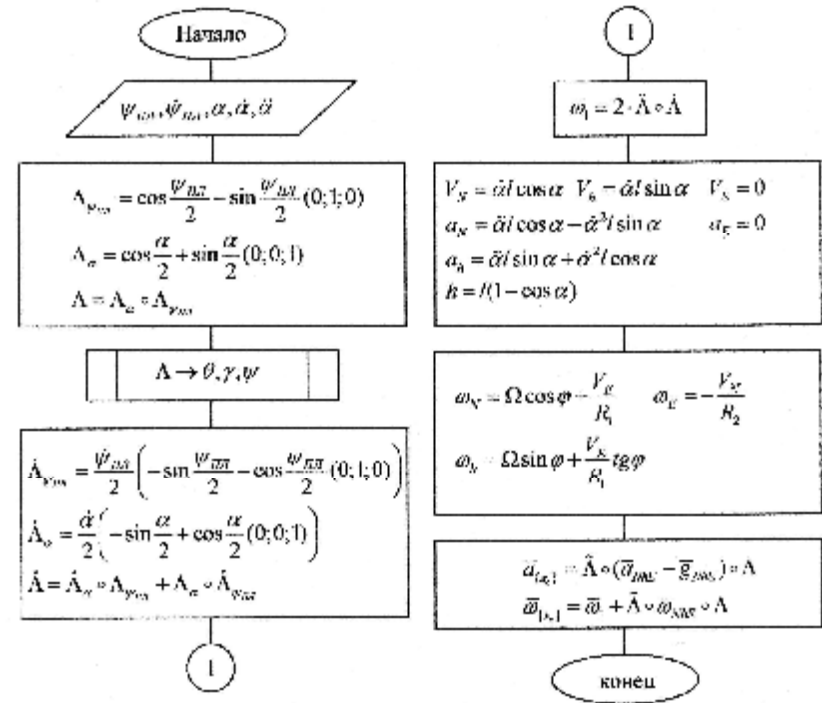


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения НП и показаний ИБ

В алгоритме использованы следующие обозначения:

$\psi_{пл}, \psi_{пл}, \alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$ – переменные, отвечающие текущему состоянию ДПС,

$\Lambda_{\psi_{пл}}, \Lambda_{\psi_{пл}}, \Lambda_{\alpha}, \Lambda_{\alpha}$ – вспомогательные переменные,

$\Lambda, \dot{\Lambda}$ – кватернион ориентации ИБ относительно местной географической системы координат и его производная,

q, g, γ – углы тангажа, крена и курса соответственно,

ω_i – угловая скорость вращения ИБ в местной географической системе координат,

$V_N, V_h, V_E, a_N, a_h, a_E$ – составляющие скорости и ускорения ИБ в местной географической системе координат,

l – длина ручки ДПС,

h – высота места расположения ИБ,

w_N, w_h, w_E – составляющие вектора угловой скорости вращения местной географической системы координат,

\vec{g}_{NhE} – вектор ускорения свободного падения

$a_{\{x_c\}}$ – вектор кажущегося ускорения ИБ в проекциях на оси чувствительности ИБ,

$w_{\{x_c\}}$ – вектор угловой скорости вращения ИБ в проекциях на оси чувствительности ИБ.

В данном алгоритме параметры κ , R_1 , R_2 рассчитываются по следующим формулам:

$$k = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 j}, \quad R_1 = \frac{a_0 + h}{k}, \quad R_2 = \frac{(a_0 + h)(1 - e^2)}{k^3}$$

где $a_0 = 6378137\text{м}$ – большая полуось земного эллипсоида;

$e^2 = 0.0066943800$ – квадрат первого эксцентриситета земного эллипсоида;

j – географическая широта места.

Вектор \vec{g}_{NhE} считаем постоянным в силу неизменности географической широты места расположения ИБ.

В алгоритме используется процедура получения углов курса, тангажа и крена по компонентам кватерниона ориентации [5]:

$$q = \arcsin(2I_0I_3 + 2I_2I_1),$$

$$\gamma = \text{sign}(r_1) \cdot \arcsin \frac{-2I_0I_2 + 2I_3I_1}{\cos q} + \frac{p}{2}(1 - \text{sign}(r_1)),$$

$$g = \text{sign}(r_2) \cdot \arcsin \frac{2I_0I_1 - 2I_3I_2}{\cos q} + \frac{p}{2}(1 - \text{sign}(r_2)),$$

где $r_1 = I_0^2 + I_1^2 - I_2^2 - I_3^2$, $r_2 = I_0^2 + I_2^2 - I_1^2 - I_3^2$, $I_j, j = \overline{0,3}$ – компоненты кватерниона Λ .

Результаты моделирования. Рассмотрим типичные результаты работы имитационной модели. С помощью алгоритма промоделировано некоторое простое движение, для которого известно изменение навигационных параметров (НП). Пусть платформа в течение 5 секунд поворачивается вокруг

оси Y на 90° , затем 1 секунду находится в состоянии покоя, после чего поворачивается в течение 4 секунд вокруг оси \bar{q} на 90° . Такому движению соответствует изменение угла курса γ от 0° до 90° в интервале времени от 0с до 5с, а также изменение угла крена g от 0° до 90° в интервале времени от 6с до 10с. При вращении платформы вокруг оси \bar{q} также будет изменяться высота h . В данной реализации длина «ручки» ДПС принималась равной 1м, что приводит к изменению высоты на 1м. В результате моделирования имитатор генерирует показания ИБ, как на рис.3.

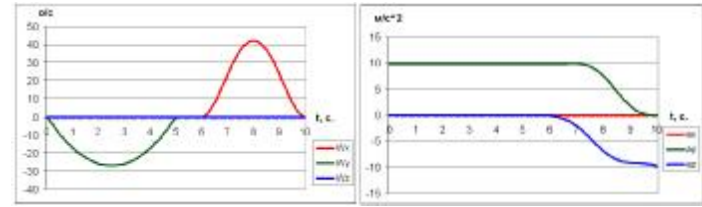


Рис. 3. Сгенерированные имитатором движения показания ИБ

Для проверки правильности функционирования имитатора движения ДПС используем сгенерированные значения в качестве исходных данных для алгоритмов бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Эти алгоритмы, по сути, решают «обратную» задачу, а именно, интегрируя уравнения движения, формируют навигационные параметры, приведенные на рис.4.

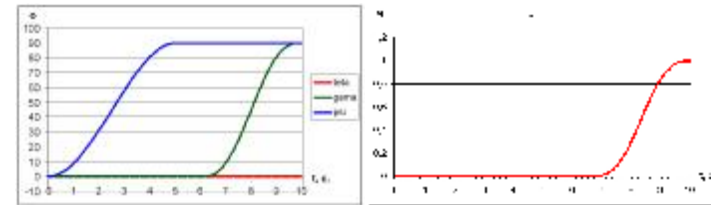


Рис.4. Навигационные параметры, полученные в БИНС

Из результатов следует, что навигационные параметры, вычисляемые БИНС по сгенерированным моделью измерениям ИБ, совпадают с их эталонными значениями. Имитационная модель тестировалась на различных видах движения, сгенерированные ею данные были проверены на адекватность.

Выводы. Созданная имитационная модель движения ДПС отвечает следующим требованиям:

- генерирует показания инерциальных датчиков, адекватные их реальной работе;
- генерирует точные (эталонные) значения навигационных параметров ИБ;
- позволяет моделировать различные виды движения, характерные для данной установки.

Выходные данные имитационной модели: угловая скорость и кажущееся ускорение в проекциях на приборные оси ИБ, будут использованы для создания и отладки алгоритмов паспортизации ИБ.

Список литературы: 1. Анучин О.Н., Емельянец Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. Санкт-Петербург 1999. – 357с. 2. Аникейчев В.С., Атаманов Н.А., Поликовский Е.Ф. Методика калибровки акселерометров. Сборник статей XXII научно-технической конференции памяти Н.Н. Острякова. 3. Крузе С.В., Лене С.Н., Молчанов А.В., Поликовский Е.Ф. Калибровка триады лазерных гироскопов. "Гироскопия и навигация" №4 (55), 2006. – 87с. 4. Брославец Ю.Ю., Фомичев А.А., Колчев А.Б., Успенский В.Б. Имитационная модель движения летательного аппарата. Сборник статей IX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. 5. Успенский В.Б. Теоретические основы гиросилового управления ориентацией космического летательного аппарата. Монография. – Харьков: НТУ «ХПИ». - 2006. – 328с.

Поступила в редколлегию 18.09.09

УДК 621.384:66.045.1:536.27

А. М. ГАНЖА, канд. техн. наук,
Н. А. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У СКЛАДНИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ

В статті пропонуються математична модель та алгоритми для комп'ютерного моделювання складних теплообмінних апаратів. Результати моделювання зіставлені з відомими даними та можуть використовуватись для системного аналізу процесів у теплообмінних апаратах.

В статье предлагаются математическая модель и алгоритмы для компьютерного моделирования сложных теплообменных аппаратов. Результаты моделирования сопоставлены с известными данными и могут использоваться для системного анализа процессов в теплообменных аппаратах.

In the article there have been proposed mathematical model and algorithms for simulation of difficult heat-exchange apparatus. The simulation results are compared with known data and may be used for system analysis of process in heat-exchange apparatus.

Вступ. У теперішній час теплообмінні апарати широко використовуються у різних галузях національної економіки. Для аналізу теплового стану

теплообмінників необхідно знати локальні температурні характеристики у різних точках апарату. Це дозволить аналізувати їх ефективність на різних режимах експлуатації, а також прогнозувати їх ресурс з урахуванням експлуатаційних факторів, якими можуть виступати забруднення, відкладення, корозійно-ерозійний знос, контактні термічні опори та ін. Необхідність отримання локальних температурних характеристик вимагає використання методів комп'ютерного моделювання.

Теплообмінне обладнання належить до класу складних технічних систем, тому що може компонуватися з багатьох секцій, кожна з яких може бути класифікована за плинном теплоносіїв, що гріє та нагрівається. Для наближення схеми до найбільш ефективної, тобто протитокової, у теплообмінниках з перехресним плинном використовуються багатоходові схеми компонування. При достатній кількості ходів взаємний рух теплоносіїв наближається до класичного протитоку. Така схема взаємного плинну теплоносіїв називається змішаною.

Для теплообмінників з простою змішаною схемою, де кожен хід представляє собою будь-які однакові теплообмінники (секції), залежності для побудови розподілу температур, визначення ефективності апарату описані у роботах [1, 2 та ін.]. У цій схемі припускається, що обидва теплоносії між ходами цілком перемішуються.

На практиці найбільш розповсюдженою схемою компонування теплообмінників є складна змішана схема току. На відміну від простої змішаної схеми тут один з теплоносіїв рухається окремими струменями за всією довжиною та між ходами не перемішується, а теплоносії, що знаходяться усередині, у межах одного ходу як правило рухається окремими струменями та між ходами цілком перемішується. Таким чином, схема змішаного плинну буде складною, де кожен хід (секція) представляє собою складну схему однократного перехресного плинну. Для таких схем залежності для побудови розподілу температур на вході та виході з кожного ходу, визначення ефективності апарату у відомих роботах не приводяться (крім частинних випадків у [2]). Тому математичне моделювання температурних характеристик та ефективності таких апаратів є актуальною задачею.

Постановка задачі. У даній роботі поставлена задача розробки математичної моделі для складних теплообмінних апаратів та створення методики, що дозволяє одержати розподіл температурних характеристик по кожному окремому елементу теплообмінника і в апараті в цілому. Створена методика повинна дати можливість проводити системний аналіз, як знову проєктованих, так і діючих теплообмінників, а також здійснювати оптимізацію характеристик апаратів.

Розв'язання проблеми. Апарати, що розглядаються, можуть мати різне компонування теплообмінних поверхонь: рівнобіжне чи послідовне протитокове включення секцій по зовнішньому теплоносію, причому секції можуть бути одноходовими чи багатоходовими. У межах однієї секції